

могут быть использованы как удобрения в сельском хозяйстве; «старые» осадки, отягощённые тяжёлыми металлами, могут быть использованы в сухом состоянии как наполнитель в асфальтобетон.

Как наполнитель в асфальтобетон (заменитель минерального порошка) могут быть рекомендованы осадки сточных вод возрастом не менее 10 лет. Физико-механические показатели асфальтобетонов с наполнителем из шламов песковых площадок и осадков иловых площадок в количестве до 7% от массы асфальтобетона полностью удовлетворяют требованиям ГОСТ 9128-84. Удельная утилизация составляет до 150 кг в 1 м<sup>3</sup> асфальтобетона.

1. Матвеева И.В., Мыськова Г.М. Существование проблемы утилизации осадков сточных вод как актуальной на сегодняшний день в г. Луганске // Вісник ДонДАБА. Вип.6(31). – Макіївка, 2001. – С. 86-89.

2. Гюнтер Л.И., Гольдфарб Л.Л. Метантенки. – М.: Стройиздат, 1991. – 128 с.

3. Ковальчук В.А. Очистка стічних вод. – Рівне: ВАТ "Рівненська друкарня", 2002. – 662 с.

4. Обезвреживание отходов гальванических процессов // Мир науки. – 1990. – №2. – С.31-32.

5. НСАМ Инструкция № 341-ХС Атомно-абсорбционное определение токсичных тяжёлых металлов в почвах и донных отложениях. – М.: ВИМС, 1991.

6. Дрозд Г.Я., Зотов Н.И., Маслак В.Н. Техничко-екологіческие записки по проблеме утилизации осадков городских и промышленных сточных вод. – Донецк, 2001. – 340 с.

*Получено 18.06.2003*

УДК 628.316

В.Е.ТЕРНОВЦЕВ, д-р техн. наук, Г.М.КОЧЕТОВ, канд. хим. наук

*Киевский национальный университет строительства и архитектуры*

Л.И.ПОТАПЕНКО

*Киевский национальный университет им.Т.Г.Шевченко*

## **РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОЧИСТКИ ПРОМЫВНЫХ СТОЧНЫХ ВОД ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ В ОСВЕТИТЕЛЕ СО ВЗВЕШЕННЫМ ОСАДКОМ**

Построена математическая модель очистки сточных вод линии никелирования от взвешенных веществ и ионов железа в осветлителе со взвешенным осадком, предложено ее аналитическое решение. Рассчитаны оптимальные значения основных параметров очистки воды в осветлителе, которые согласуются с экспериментальными.

Промывные сточные воды гальванических производств образуются при промывке металлоизделий после их химической и электрохимической обработки. На основании анализа большого количества данных состава сточных вод цехов и участков никелирования, усредненные значения основных загрязнений можно охарактеризовать сле-

дующими показателями:

- $pH=3-4$ ;
- концентрация взвешенных веществ – до 50 мг/л;
- содержание ионов  $Ni^{2+}$  и  $Fe^{2+}$  – до 60 мг/л каждого.

Существующие технологические схемы обезвреживания таких вод не предусматривают возможности повторного использования дорогостоящих соединений никеля и очищенной воды. Наличие в промывной воде соединений железа препятствует регенерации никеля и созданию замкнутого цикла водооборота [1, 2]. Поэтому разработке методов удаления соединений железа из сточных вод цехов никелирования в настоящее время уделяется особое внимание.

Основным недостатком традиционных гидролитических методов селективного извлечения ионов железа из раствора в виде гидроксида железа (III) является то, что из-за своей низкой растворимости в воде  $Fe(OH)_3$  находится в мелкодисперсном состоянии. Это делает неэффективным как фильтрование раствора, так и седиментацию  $Fe(OH)_3$  [3]. Нами предложен комплексный процесс очистки промывных вод цехов никелирования, а также обосновано использование в его технологической схеме осветлителя со взвешенным осадком в качестве реактора, в котором протекают процессы гидролитического образования высокодисперсных частиц  $Fe(OH)_3$  и их сорбционного удаления из очищаемой воды [4]. По этой технологии для обеспечения практически полного удаления ионов железа в виде гидроксида очищаемая вода перед поступлением в осветлитель обрабатывается в смесителе раствором пероксида водорода для окисления соединений двухвалентного железа в трехвалентное, а затем нейтрализуется щелочным реагентом до значений  $pH=6-7$ . Следует отметить, что концентрация ионов  $Ni^{2+}$  практически не изменяется в процессе обработки сточной воды в осветлителе, поскольку в указанном выше интервале  $pH$  невозможно образование гидроксида и других труднорастворимых соединений никеля. Обработка воды в осветлителе позволяет также существенно снизить общую концентрацию взвешенных веществ и таким образом повысить эффективность последующей доочистки воды на скорых песчаных фильтрах.

Для осветления небольших объемов промывных вод (до 50 м<sup>3</sup>/сутки), характерных для линии никелирования, нами предлагается использование осветлителя, принципиальная схема которого приведена на рис.1. Процесс осветления воды имеет физико-химическую

природу, заключающуюся в прилипании мелких частиц взвеси, извлекаемых из воды, к крупным частицам взвешенного осадка (хлопьям). Чтобы высота взвешенного слоя  $x$  и начальная концентрация взвешенного осадка  $\sigma_0$  оставались неизменными при постоянной скорости восходящего потока  $v$  на верхней границе взвешенного слоя часть воды с избыточным количеством осадка должна непрерывно отводиться в осадкоуплотнитель. Баланс воды в осветлителе определяется равенством

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (1)$$

где  $Q$  – общий расход осветляемой воды;  $Q_1$  – часть воды, поступающая в зону осветления;  $Q_2$  – часть воды с осадком, поступающая в осадкоуплотнитель. С учетом коэффициента распределения воды  $K_p$  между зоной осветления и осадкоуплотнителем  $Q = K_p Q + (1 - K_p) Q$ . (2)

В литературе [5-8] приведены многочисленные сведения о теоретических основах процесса осветления воды, принципе действия осветлителей и методах их расчета.

Однако существующие методы расчета технологических параметров осветлителей базируются в основном на рекомендациях, которые пригодны только для описания процессов удаления взвесей из воды, но не учитывают возможные химические превращения веществ, которые содержатся в воде в молекулярной или ионной формах, а также последующее поведение образующихся в результате этих реакций дисперсных частиц.

Целью настоящей работы является расчет основных параметров очистки промывных сточных вод линии никелирования в осветлителе со взвешенным осадком на основании математического моделирования процесса. Предложенная математическая модель очистки воды базируется на следующих предпосылках и допущениях, не вносящих существенных погрешностей в расчеты:

Физическая сущность процесса осветления воды рассматривается

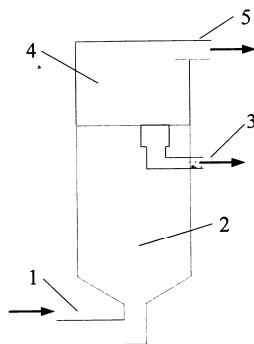


Рис.1 – Схема осветлителя со взвешенным осадком:

- 1 – подача воды; 2 – рабочая камера;
- 3 – отвод осадка; 4 – зона осветления;
- 5 – отвод воды на фильтры.

как процесс фильтрации со скоростью  $v$  (равной скорости восходящего потока осветляемой воды) через пористую среду хлопьев взвешенного слоя. Коллоидные и суспендированные частицы, содержащиеся в осветляемой воде и образующиеся в ней в результате гидролиза ионов  $Fe(III)$ , адсорбируются на поверхности хлопьев взвешенного осадка, которые частично выводятся из взвешенного слоя.

Концентрация взвешенного осадка  $\sigma_0$  в осветлителе не изменяется со временем и практически постоянна по всей высоте слоя  $x$ .

В предлагаемой ниже математической модели принято, что скорость реакции гидролитического превращения ионов  $Fe^{3+}$  в гидроксид железа (III) описывается уравнением первого порядка [8, 9]

$$R = Kc_1, \quad (3)$$

где  $c_1$  – массовая концентрация ионов  $Fe^{3+}$ ;  $K$  – константа скорости реакции.

Кинетика адсорбции дисперсных частиц на поверхность хлопьев взвешенного осадка принимается согласно [5] по уравнению

$$\frac{\partial \sigma_2}{\partial t} = \alpha \sigma_0 c_2, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – параметр, характеризующий интенсивность адсорбции;  $c_2$  и  $\sigma_2$  – массовые концентрации дисперсных частиц в растворе и осевших на хлопьях взвешенного осадка, соответственно.

5. Движение жидкости происходит при постоянной площади поперечного сечения осветлителя в одном направлении (снизу вверх), т.е. имеет место одномерное движение в направлении оси  $OY$ . В любом поперечном сечении осветлителя характерно равномерное распределение концентраций  $c_1, c_2, \sigma_2, \sigma_0$ .

С учетом принятых допущений, не вносящих существенных погрешностей в расчеты, нами предложена следующая математическая модель очистки сточных вод линии никелирования в осветлителе со взвешенным осадком:

$$n_0 \frac{\partial c_1}{\partial t} = -v \frac{\partial c_1}{\partial x} - Kc_1; \quad (5)$$

$$n_0 \frac{\partial c_2}{\partial t} = -v \frac{\partial c_2}{\partial x} - \frac{\partial \sigma_2}{\partial t} + Kc_1; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \sigma_2}{\partial t} = \alpha \sigma_0 c_2, \quad (7)$$

где  $n_0$  – пористость слоя хлопьев, т.е. отношение объема пустот к его общему объему.

Начальные и граничные условия для предложенной модели будут иметь вид:

$$\text{при } x=0, t>0 \quad c_1 = c_1^0, \quad c_2 = c_2^0;$$

$$\text{при } t=0, x>0 \quad c_1 = 0, \quad c_2 = 0.$$

Решение математической модели реализуется аналитическим методом. В результате применения к системе (5)-(7) преобразования Лапласа по временной переменной  $t$  получаем следующие выражения для концентраций  $c_1$  и  $c_2$ :

$$c_1 = c_1^0 e^{-\frac{Kx}{v}} \eta(\bar{t} - \bar{x}); \quad (8)$$

$$c_2 = \left[ c_2^0 e^{-\frac{\alpha \sigma_0 x}{v}} + \frac{K c_1^0}{K - \alpha \sigma_0} \left( e^{-\frac{\alpha \sigma_0 x}{v}} - e^{-\frac{Kx}{v}} \right) \right] \eta(\bar{t} - \bar{x}), \quad (9)$$

$$\text{где } \eta(\bar{t} - \bar{x}) = \begin{cases} 0 & \text{при } \bar{t} < \bar{x}, \\ 1 & \text{при } \bar{t} \geq \bar{x} \geq 0; \end{cases} \quad \bar{t} = \frac{K}{n_0} t; \quad \bar{x} = \frac{K}{v} x.$$

Из уравнения (7) в результате его интегрирования по времени

$$\sigma_2 = \alpha \sigma_0 \int_0^t c_2(x, \tau) d\tau$$

находим выражение для определения  $\sigma_2$ :

$$\sigma_2 = \alpha \sigma_0 \left[ c_2^0 e^{-\frac{\alpha \sigma_0 x}{v}} + \frac{K c_1^0}{K - \alpha \sigma_0} \left( e^{-\frac{\alpha \sigma_0 x}{v}} - e^{-\frac{Kx}{v}} \right) \right] t \eta(\bar{t} - \bar{x}), \quad (10)$$

В работах [5-7] показано, что для взвешенного слоя скорость восходящего потока  $v$  зависит от концентрации хлопьев  $\sigma_0$ . Наиболее известное выражение, связывающее  $v$  и  $\sigma_0$ , имеет вид

$$\sigma_0 = G / v^b, \quad (11)$$

где  $G$  – гидродинамическая характеристика хлопьев;  $b$  – опытная кон-

станта.

Поскольку экспериментальные величины константы  $b$  находятся в интервале 0,93-1,12 [6] для различных условий осветления воды, то без большой погрешности в расчетах ее можно принять равной 1. Тогда, подставляя уравнение (11) в (9) и полагая  $b = 1$ , получаем окончательные формулы для расчета изменения концентраций ионов железа ( $c_1$ ) и дисперсных частиц ( $c_2$ ) по высоте осветлителя во времени:

$$c_1 = c_1^0 e^{-\frac{Kx}{v}} \eta(\bar{t} - \bar{x}); \quad (12)$$

$$c_2 = \left[ c_2^0 e^{-\frac{\alpha G x}{v^2}} + \frac{K c_1^0}{K - \alpha G / v} \left( e^{-\frac{\alpha G x}{v^2}} - e^{-\frac{Kx}{v}} \right) \right] \eta(\bar{t} - \bar{x}). \quad (13)$$

Приведенная модель и разработанная на ее основе методика расчета позволяют, исходя из заданных эффектов осветления  $c_2(x)/c_2^0$  и обезжелезивания очищаемой воды  $c_1(x)/c_1^0$ , выбрать оптимальные значения основных характеристик осветлителя: скорости восходящего потока  $v$ , высоты слоя взвешенного осадка  $x$ , концентрации хлопьев взвешенного осадка  $\sigma_0$ , а также других его конструктивно-технологических параметров. Так, уравнение (13) выражает зависимость остаточного содержания ионов железа в очищаемой воде от высоты слоя взвешенного осадка и скорости восходящего потока при исходной концентрации ионов  $Fe^{3+}$ , равной 60 мг/л. Значение кинетической константы  $K = 1,1 \cdot 10^{-3}$  получено нами в результате обработки экспериментальных данных, приведенных в [9], по методике [10]. Величину пористости слоя хлопьев  $n_0$  приняли равной 0,35. На рис.2 приведены рассчитанные по уравнению (12) кривые удаления ионов  $Fe^{3+}$  из воды в осветлителе со взвешенным осадком. Как видно из представленных на рис.2 данных, при высоте слоя осадка 2 м и скорости восходящего потока менее 0,9 мм/с степень извлечения железа, находящегося в ионной форме в очищаемой воде, превышает 95%. Уравнение (13) определяет влияние основных параметров осветлителя на протекание процесса удаления взвешенных частиц из воды. В соответствии с данными, приведенными в [11], значение коэффициента

адсорбции  $\alpha$  принимаем равным  $1,5 \cdot 10^{-6}$ , а величину коэффициента  $G - 0,56$ . Расчетные кривые осветления воды для исходных концентраций взвешенных веществ – 50 мг/л и ионов  $Fe^{3+}$  – 60 мг/л приведены на рис.3. Результаты расчета согласуются с экспериментальными данными Е.Ф.Кургаева [11], что свидетельствует об адекватности используемой модели. Следовательно, данную модель можно применять для расчета параметров процесса очистки воды в осветлителе со взвешенным осадком.

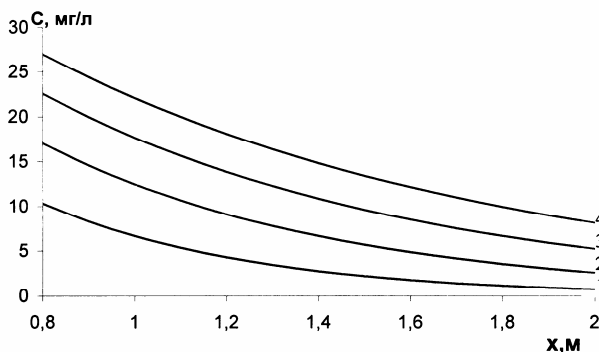


Рис.2 – Расчетные кривые зависимости концентрации ионов трехвалентного железа (C) в осветленной воде от высоты слоя взвешенного осадка (x) при различных скоростях восходящего потока воды: 1 – 0,5; 2 – 0,7; 3 – 0,9; 4 – 1,1 мм/с.

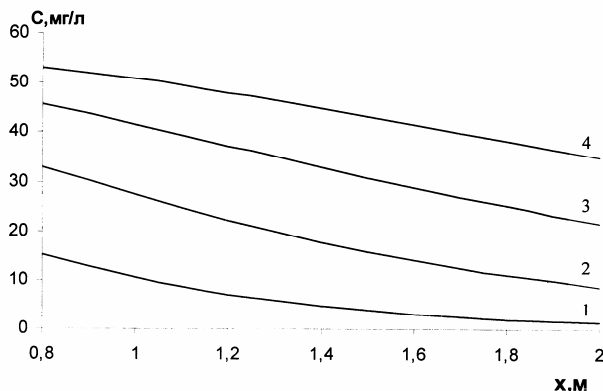


Рис.3 – Расчетные кривые зависимости концентрации взвешенных веществ (C) в осветленной воде от высоты слоя взвешенного осадка (x) при различных скоростях восходящего потока воды: 1 – 0,5; 2 – 0,7; 3 – 0,9; 4 – 1,1 мм/с.

В результате анализа данных, представленных на рис.2, 3, рекомендуются следующие оптимальные значения основных параметров очистки промывных вод линии никелирования в осветлителе: высота взвешенного слоя – 2 м, скорость восходящего потока осветляемой воды в зоне взвешенного осадка – 0,7 мм/с. Эти данные могут быть использованы при внедрении разработанной нами промышленной технологии комплексной обработки промывных сточных вод.

1. Гальванотехника: Справочник. / Под ред. А.М.Гринберга. – М.: Металлургия, 1987. – 736 с.

2. Кочетов Г.М., Терновцев В.Е. Комплексная обработка промывных сточных вод цехов никелирования // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.43. – К.: Техніка, 2002. – С. 185-191.

3. Терновцев В.Е., Кочетов Г.М. Замкнутая система очистки промывных вод линии никелирования гальванических производств // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.47. – К.: Техніка, 2003. – С. 162-167.

4. Вайнштейн И.А. Очистка и использование сточных вод травильных отделений. – М.: Металлургия, 1986. – 109 с.

5. Николадзе Г.И., Минц Д.Н., Костальский Н.А. Подготовка воды для питьевого и промышленного и водоснабжения. – М.: Высш. школа, 1984. – 368 с.

6. Клячко В.А., Апельцин И.Э. Очистка природных вод. – М.: Стройиздат 1971. – 579 с.

7. Кургаев Е.Ф. Осветлители воды. – М.: Стройиздат 1977. – 192 с.

8. Кульский Л.А. Основы химии и технологии воды. – К.: Наук. думка, 1991. – 565 с.

9. Кульский Л.А., Когановский А.М., Гороновский И.Т., Шевченко М.А. Физико-химические основы очистки воды коагуляцией. – К.: Изд-во АН УССР, 1950. – 108 с.

10. Гордин И.В. Оптимизация химико-технологических систем очистки промывных сточных вод. – М.: Химия, 1977. – 176 с.

11. Кургаев Е.Ф. Основы теории и расчета осветлителей. – М.: Стройиздат 1962. – 192 с.

*Получено 18.06.2003*

УДК 574.63 : 626

Ф.В.СТОЛЬБЕРГ, д-р техн. наук, В.М.ЛАДИЖЕНСКИЙ, канд. техн. наук  
*Харківська державна академія міського господарства*

## **ОЧИЩЕНИЯ СТИЧНИХ ВОД МАЛИХ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТИВ**

Пропонується рішення проблеми очищення стічних вод від багатоповерхових будинків, окремих підприємств та інших об'єктів, розташованих у сільській місцевості, з використанням фітотехнології, що набула поширення у багатьох країнах.

Для забезпечення житлом робітників місцевих підприємств, які створювалися в сільській місцевості, у 60-80 роках минулого сторіччя в багатьох селах були зведені багатоповерхові будинки й відповідні споруди для очищення стічних вод, що від них надходять. Очисні спо-